

35kV及以下用户变电站的深化设计研究

张颖

衡诚能源科技(上海)有限公司 上海 200000

摘要: 针对35kV及以下用户变电站常规设计中空间适配性不足、系统配置冗余、专业协同脱节等共性痛点,本文基于国家输变电设计规范与上海地区电网接入要求,构建了用户变电站全流程深化设计技术体系,明确了五大核心设计原则,提出了进线路由前置校核、运输路径全流程管控、主接线属地化优化、平面布局流线化设计、多专业协同管控5项关键技术及配套量化校验方法,并通过上海浦东张江科学城产业园35kV用户变电站工程完成全技术链条验证。结果表明,该体系可系统性解决常规设计典型问题,单站减少高压开关柜6面,缩短母线及电缆线路250m,避免大量拆改及部分验收不合规问题,降低初始投资约270万元,同时显著提升变电站空间利用率与供电可靠性。研究成果可为同类型用户变电站精细化设计提供技术参考与工程示范。

关键词: 35kV及以下用户变电站;深化设计;主接线优化;平面布局;多专业协同;输变电工程

前言

随着城市核心区用电负荷持续增长,叠加双碳目标下分布式电源、用户侧储能的规模化接入,35kV及以下用户变电站已从传统电能分配节点转变为用户侧能源枢纽,对供电可靠性、空间集约化、运行经济性提出了更高要求。上海这类超大型城市土地资源紧张、电网管控严格,用户变电站设计不仅需满足通用规范,更需兼顾项目边界条件、属地电网要求与全生命周期成本控制。

传统研究主要围绕各个变电站的主接线是否可靠、电气设备选型是否合适等方向展开,而对于各个地区用户侧变电站的深化,围绕如何根据所属地区电网的要求开展全过程深化设计,至今仍缺少较为系统性的探讨。在工程实践中,如果按照常规设计,往往根据经验照抄各自设计院的标准模板,存在仅仅满足规范最低要求,精细化思考不够全面,也不能在设计前期将设备具体参数、电网外线接入条件、各个专业之间的协同等因素统筹考虑,就会导致项目实工过程中,频繁出现净高不足、运输通道受限、各专业管线之间冲突、投资超过预期等问题,有时甚至影响电网接入的合规性,从而导致工程不能顺利通过电网验收。

针对上述问题,本文通过上海地区35kV及以下用户变电站为研究对象,梳理一套全过程深化设计的技术底框,并根据众多项目问题,系统性总结了传统设计中的一些典型痛点问题以及其这些问题的成因,提出了一些关键优化技术与手段,并结合量化校验的方法,再根据

完整工程实例加以验证,目的为变电站同类项目的深化设计提供可参考的技术路径与手段。

一、用户变电站深化设计的核心原则与技术架构

1. 核心设计的原则

对于用户变电站的深化设计,其本质是在严格遵守电气规范红线的前提下,同时结合用户的实际需求,使项目的全周期效益达到最高。变电站的深化设计工作应遵守以下五项基本准则:

安全与合规同等重要原则: 深化设计后,不仅要满足国家输变电工程的强制性设计与验收标准,同时也要符合所属地区供电公司提出的电网接入等技术规定,暴增接入合规与运行安全同步落实。

空间利用率高: 一般建筑空间比较紧张,避免过度浪费有效空间,在满足电气设备安全间距及运维操作所需空间要求的前提下,合理利用变电站空间,并尽可能减小建筑面积的原则,适当优化变电站空间利用率。

负荷适配性原则: 对于变配电的系统设计,变电站的选址首要考虑的是距离附中中心就近,同时对于设备的主接线形式以及电气设备要根据用户的负荷等级及用电规律合理确定,避免出现大马拉小车等过度冗余的配置。

全周期成本最优原则: 综合考量变电站的初期建设投入、运行期间的损耗以及后期维护费用以及未来扩容性,来实现总体经济效益最优原则。

多专业协同原则：变电站以电气专业为主导，同时协同暖通、给排水、消防等专业，确保各专业在设计过程中同步开展、并不断进行动态校核，杜绝专业之间信息脱节。

2. 全过程深化设计的技术架构

根据前面的深化设计的核心原则，本文系统构建了一个包含五阶段的闭环式深化设计技术架构：第一，前期电网接入条件的校核，提前确定所属项目的外线接入条件以及一些电气设备的关键参数信息；第二，针对各个地区的电气系统因地制宜的方案优化，对主接线等一次系统，开展符合属地验收要求的系统性检验，并结合经济性进行定量择优；第三，空间布局精细化合理设计，着重落实好大型电气设备的运输路径与平面布置的贯通性验证；第四，多专业协同深化，各专业安装前，对各专业管线进行综合碰撞检查与逐一核对，确保管线间不互相影响；第五，安装落地性复查，与所属项目的设备厂家对接，并对施工可行性进行确认。根据以上几点，此形成完整的深化设计闭环管控流程。

二、常规设计典型痛点与根源分析

本文通过对上海地区数十个用户变电站的工程实践进行了复盘与梳理，总结归纳出传统设计中普遍存在的四类典型问题以及形成这些问题的其根本原因：

第一类，前期接入条件不够充足。主要表现为外线电缆由于市政管线复杂，条件受限，导致难以按照预先设计定位接入、设备运输通道受现场施工条件限制，运输受阻、设备空间净高考虑不足。其根本原因就是设计过程采取“先出图、后复核”的方式，未在设计前期充分锁定外线管线条件、设备想详细尺寸规格及施工需求，导致方案阶段的设计与实际现场施工阶段严重脱节，后期被迫返工整改。

第二类，电气系统设计不能属地化并过分冗余。主要体现在主接线方式根据各自设计院的标准模板、母排与电缆路径过度弯折方便出预算。根本原因在于缺少对变电站所属地区的电气系统要求，缺少可靠性与经济性的量化权衡，设计偏于保守，造成空间占用与工程造价的非必要浪费。

第三类，空间布局精细度不足。表现为柜体尺寸预留偏大、桥架排布杂乱无章。根本原因在于设计采用“大致预留”的思路，未能依据设备真实参数进行精细化布置，缺少对桥架走向与线缆容量的定量核算，导致空间利用率下降，也给后期运维带来不便。

第四类，多专业协同机制缺失。集中反映为暖通、给排水、照明等管线与电气设备位置冲突，严重时甚至将风口、水管布置于高压柜母线的正上方，形成安全隐患。根本原因在于未建立以电气专业为牵引的协同机制，各专业彼此串行推进、缺乏交互，缺少贯穿全过程的设计校核，使方案在安全性与落地性上存在先天不足。

三、深化设计关键技术与工程验证

针对上述痛点，本文以国家强制规范为底线，结合上海电网管控要求，提出5项核心关键技术及量化校验方法，并通过上海浦东东江科学城产业园35kV用户变电站工程完成全链条综合验证。

1. 核心关键技术体系与量化校验依据

本文提出的关键技术均以量化计算为核心，摒弃经验化粗放设计模式，各技术核心规范依据与校验公式如下：

(1) 进线路由与接入条件前置校核技术

本技术核心是将外线接入合规性校验前置至设计启动阶段，规避方案颠覆性调整，核心校验公式包括：

1) 电缆最小允许弯曲半径校验（上海电网要求严于国标）：

$$R_{min} \geq K \cdot D$$

式中： R_{min} 为电缆最小弯曲半径； K 为弯曲半径倍数，35kV电缆上海电网要求 $K \geq 20$ ； D 为电缆标称外径。

2) 电缆桥架填充率校验：

$$\eta = \frac{S_{sum}}{S_{bridge}} \times 100\% \leq [\eta]$$

式中： η 为桥架填充率，电力电缆允许上限 $[\eta]=40\%$ 。

3) 高压电缆热稳定校验：

$$S_{cable} \geq \frac{\sqrt{Q_i}}{C} \times 10^3$$

式中： S_{cable} 为电缆最小允许截面； Q_i 为短路电流热效应值； C 为铜芯电缆热稳定系数，取137。

(2) 设备运输路径全流程校核技术

本技术核心是实现设备运输全路径贯通性量化校核，避免后期拆改，核心校验公式包括：

1) 运输最小转弯半径校验：

$$R_{turn} \geq \frac{L}{2 \sin \alpha} + \frac{b}{2}$$

式中： R_{turn} 为最小转弯半径； L 为运输车轴距； α 为最大转向角，室内平板车取 30° ； b 为设备最大宽度。

2) 运输门洞最小净空校验:

$$H_{door} \geq H_{device} + H_{trolley} + \Delta H$$

式中: ΔH 为安全余量, 规范要求 $\geq 100\text{mm}$ 。

(3) 基于全生命周期成本校验

本技术核心是在满足属地电网要求与供电可靠性的前提下, 实现系统配置经济性优化, 全生命周期生命成本校验公式如下:

1) 全生命周期成本LCC校验:

$$LCC = CI + CO + CM + CF + CD$$

式中: CI 为初始投资, CO 为年运行能耗成本, CM 维护检修成本, CF 故障损失成本, CD 残值。

(4) 基于流线优化的平面布局精细化设计技术

本技术核心是通过顺向电能流线优化, 实现空间利用率、线路损耗、运维便利性协同提升, 强制安全净距要求如下:

10kV系统裸导体对地/相间最小净距125mm, 35kV系统300mm, 单面布置开关柜运维通道宽度 $\geq 800\text{mm}$ 。

(5) 电气主导的多专业协同深化技术

本技术核心是建立电气主导的并行设计机制, 消除专业脱节导致的安全隐患, 上海电网及强制规范均要求: 配电室裸带电体正上方严禁设置给排水管道、送回风口、可维护照明灯具。

2. 工程综合验证

(1) 项目概况

本项目为上海浦东张江科学城高端智能制造产业园配套35kV用户变电站, 园区总建筑面积28万 m^2 , 用电负荷以二级负荷为主, 含部分一级重要负荷。站内配置2台20MVA 35/10kV主变压器, 两路35kV市政电源独立进线, 10kV侧采用单母线分段接线, 站址位于园区地下一层, 可用建筑面积约2000 m^2 , 总站与分站有8个变电所, 空间高度也受限, 外线接入受市政管线与浦东电网管控要求约束极强。

项目原常规设计采用标准化模板, 未开展定制化量校验, 存在外线接入不合规、运输路径不通畅、系统配置冗余、空间布局混乱、多专业管线冲突五大类核心问题, 无法满足电网接入审核与项目实施要求, 需开展全流程深化设计优化。

(2) 关键技术综合应用与优化效果

1) 进线路由前置校核技术应用

原设计进线点位于市政道路交叉口, 不符合浦东供电公司管控要求, 且下进线预留通道无法满足35kV电缆

20D弯曲半径要求。深化设计阶段提前对接电力部门锁定合规进线点位, 在紧邻配电室处设置局部进线间与电缆夹层, 优化为上进线方案, 经公式校验, 电缆弯曲半径预留1700mm, 桥架填充率控制在35%, 既解决了合规性问题, 又实现了外线顺畅接入, 方案一次性通过电力部门审核。

2) 运输路径全流程校核技术应用

原设计运输门洞净高2.2m、转弯半径3m, 经校验无法满足2.6m高的主变压器运输需求, 且楼板荷载不达标。深化设计通过全路径贯通性校核, 将主变压器运输门洞净高调整为2.8m, 转弯半径扩大至5m, 同步对运输路段楼板进行结构加固, 彻底解决了设备运输受阻问题, 避免了后期拆改的12万元额外成本与10天工期延误。

3) 主接线属地化优化技术应用

原设计35kV侧两路进线共6面柜体, 10kV侧两段母线共24面柜体, 几个分变电所分别配置若干10kV柜, 配置冗余、空间不足。深化设计结合上海电网导则, 在满足短路电流校验、N-1通过率100%的前提下, 对各分变电所10kV柜进行合规整合, 全站共减少6面高压柜体, 并优化了大量母线及电缆线路, 经LCC核算, 直接降低初始投资270万元, 优化后方案完全符合供电可靠性要求, 顺利通过审核。

4) 平面布局流线化设计技术应用

原设计设备分散布置, 电能流向混乱, 电缆与母线路径冗长, 年功率损耗18600kWh。深化设计遵循“35kV输入-主变降压-10kV输出”的顺向流线重构布局, 在严格满足安全净距要求的前提下优化柜体排布, 累计减少35kV电缆40m、10kV电缆120米, 10kV母线槽90m, 同时提升空间利用率25%, 运维路径清晰顺畅。

5) 多专业协同深化技术应用

原设计串行设计导致风口、水管、灯具位于高压柜正上方, 违反强条要求, 且通风量、照度不达标。深化设计建立电气主导的并行设计机制, 开展全专业管线碰撞校核, 优化风管、水管、灯具位置, 避开带电体正上方, 既满足了运行环境要求, 又彻底消除了电气安全隐患, 避免了后期施工返工。

(3) 项目整体实施成效

本项目通过5项深化设计关键技术的综合应用, 系统性解决了原常规设计的所有痛点, 各项指标优化成效详见表1。

表 1

核心指标项	原设计方案指标	深化设计方案指标	量化优化成效
电网接入方案合规性	不符合浦东电网管控要求，需重改	一次性通过电力部门接入审核	方案合规性100%，避免颠覆性调整
国家规范强条符合性	存在3项强条违规隐患	100%符合国家强制规范要求	消除全部电气安全隐患，通过竣工验收
设备动热稳定校验	未开展系统短路电流量化校验	短路电流校验合格，设备选型匹配	设备动热稳定裕度满足20年运行要求
初始建设投资	变电站投资约6500万元	优化后投资约6230万元	直接降低初始投资约270万元
高压线路总长度	35kV电缆150m，10kV电缆880，10kV母线190m	35kV电缆40m，10kV电缆120m，10kV母线90m	累计缩短线路长度250m，材料成本降低约60万元
站内空间利用率	2000m ² 面积内无法合规排布设备	2000m ² 内完成全设备合规排布	空间利用率提升约25%
运维通道合规性	部分通道仅满足规范下限	所有通道预留充足运维空间	单面通道≥1000mm，双面通道≥1800mm，运维便捷
系统N-1通过率	未开展可靠性校验	100%通过N-1校验	满足一级、二级负荷供电可靠性要求
后期拆改与工期延误风险	存在重大拆改风险，延误≥17天	零拆改，无工期延误	避免现场拆改成本约12万元，工期节约至少17天

优化后的方案不仅全面解决了外线接入困难等原设计的前期问题，同时也实现了变电站设计的经济性、合理性与空间利用率、供电可靠性等的多重提升，而且也作为园区长期稳定的供电系统提供了核心保障，充分验证了本文提出的全过程深化设计技术体系的有效性与实用性。

结语

本文以35kV及以下用户变电站传统设计中普遍存在的问题为切入点，提出了一套包含全过程的深化设计技术架构，并明确了五项关键技术措施及其对应的量化校验方式，同时结合上海地区的实际工程案例进行了相关验证。实践工作表明，该架构能够系统的解决常规设计中，在合规、经济、适配、安全等方面的劣势，在保证变电站安全稳定运行的前提下，实现初期投资、运维便捷、空间利用效率以及全生命周期成本的综合改善。

该研究成果适用于上海等超大城市用户变电站的建

设场景，可为同类工程的精细化设计提供技术路径与工程参考。下一步将围绕分布式电源与储能规模化接入背景，探索深化设计的优化策略，并借助BIM技术推动数字化协同设计，促使用户变电站设计逐步从“以规范为底线”转向“以全周期精细化为主线”。

参考文献

- [1] 国网上海市电力公司. 上海电网用户变电站接入电网技术导则[Z]. 上海: 国网上海市电力公司, 2022.
- [2] 刘健, 同向前, 苏文成. 用户侧智能变电站设计关键技术[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(12): 168-175.
- [3] 王勇, 李刚, 张弛. 城市核心区户内变电站集约化设计优化研究[J]. 电力工程技术, 2020, 39(4): 178-182.
- [4] 蒲天旺. 35kV变电所供配电线路的关键施工技术研究[J]. 工程技术研究, 2021, 6(9): 145-146.